J. Lake Sci.(湖泊科学), 2027, 39(1):000-000
DOI 10.18307/2027.0143
©2027 by Journal of Lake Sciences

太湖流域太浦闸流量多因素驱动、响应与调度阈值*

吴　娟**，蔡　梅，刘　敏，季海萍，钱傲然，薛　涛，王凯燕，王雪姣
（太湖流域管理局水文局（信息中心），上海 200434）

摘　要：太浦闸作为太湖流域关键调度工程，其流量过程是自然水循环机制与人为多目标调度决策相互耦合的复杂系统响应。太浦闸流量对流域防洪、供水及水生态协同调控具有重要意义，精准把握其多因素驱动机制与响应规律，是制定科学调度阈值、实现精细化调控的关键。然而，传统方法存在对多因素驱动因子响应机制不明、调度关键阈值不清等问题。为此，本研究耦合主成分分析、校正随机率与 K-means 聚类等方法，系统解析了影响太浦闸流量的多因素驱动机制，构建了太浦闸流量与调度站降水水位响应阈值识别体系。结果表明：（1）通过机制解析，影响太浦闸流量的关键因子为区域水位协同、降雨径流效应和上下游水位拮抗三类主成分，累积贡献率达 93.47%，变量重要性排序表明平望 8:00 水位贡献最高。（2）太湖高水位情景下（＞3.80 m），太浦闸流量与太湖—平望水位差呈强线性关系（R=0.92），经 2020—2025 年长系列验证该关系年际稳定（*R*=0.90），量化了水力梯度驱动下的泄流响应能力。（3）通过校正随机性分析与阈值识别揭示当平望日际水位变幅≥0.10 m 时确定性过程占优，反之以随机波动为主；通过 K-means 聚类识别出触发平望水位显著变化的区域前一日降水量阈值 25.0 mm 可作为平望水位预警依据，分类准确率较高。降水阈值与水位变幅阈值共同构成双阈值预警体系，可为强降水情景下太浦闸自适应调度与风险规避提供先导决策支持。本研究提出的主成分降维、回归建模、聚类阈值识别的耦合框架，形成了从机制解析、规律揭示、响应量化到阈值识别的完整技术链条，实现了自然机制与调度逻辑的协同，可为平原感潮河网区复杂工程调控下的水文响应分析与精细化调度提供了可参考的数据驱动范式。
关键词：太浦闸，主成分分析，降水水位响应，K-means 聚类，平原感潮河网

Multi-factor driving, response, and regulation thresholds of Taipu Sluice discharge,Taihu Basin*

Wu Juan**, Cai Mei, Liu Min, Ji Haiping, Qian Aoran, Xue Tao, Wang Kaiyan & Wang Xuejiao
(*Bureau of Hydrology Information Center of Taihu Basin Authority, Shanghai* 200434*, P.R.China*)

Abstract:　As a key piece of regulatory infrastructure in the Taihu Basin, the flow dynamics of the Taipu Sluice arise from the combined effects of natural hydrological processes and human-driven multi-objective operations. Precise control of the sluice discharge is critical for achieving basin-wide goals related to flood control, water supply, and ecological regulation. A clear understanding of the multiple driving factors and their associated response patterns is necessary for establishing scientifically based regulation thresholds and enabling refined sluice management. However, conventional methods often lack clarity in revealing the response mechanisms to multiple drivers and in defining key regulatory thresholds. To address these issues, this study applied an integrated framework that combined principal component analysis, a corrected stochasticity rate method, and K-means clustering. This framework was used to systematically identify the main factors influencing Taipu Sluice discharge and to build a threshold system characterizing the precipitation-water level response at the regulation station. The results showed that: (1) Factor analysis reduced the driving variables into three principal components, namely regional water level synergy, rainfall-runoff effects, and upstream-downstream water-level

* 2026-01-29 收稿；2026-05-09 收修改稿;2026-05-114 录用。
水利部水利青年拔尖人才发展基金（JHQB202209），水利部重大科技项目（SKR-2022043）和上海市科技创新行动计划（21002410200）联合资助。
通信作者；E-mail：wujuan3412@163.com

antagonism. These components together explained 93.47% of the total variance. Among all variables, the 8:00 water level at Pingwang was identified as the most influential factor. (2) When the Taihu water level exceeded 3.80 m, the sluice discharge showed a strong linear relationship with the water level gradient between Taihu and Pingwang (R = 0.92). This relationship remained stable across years, as validated with data from 2020 to 2025 (R = 0.90), allowing for quantitative estimation of discharge responses to hydraulic forcing. (3) Threshold analysis indicated that when the daily change in Pingwang water level reached or exceeded 0.10 m, deterministic processes became dominant; otherwise, stochastic variations prevailed. Using K-means clustering, a regional precipitation threshold of 25.0 mm was identified as a critical point for significant shifts in the Pingwang water level. This threshold served as a reliable early warning indicator with high classification accuracy. By combining precipitation and water level variation thresholds, a dual-threshold early warning system was established. This system supports proactive decision-making for adaptive sluice regulation and risk reduction during heavy rainfall events. The proposed framework, which integrates principal component reduction, regression modeling, and cluster-based threshold detection, provides a coherent technical pathway from mechanism analysis to pattern recognition, response quantification, and threshold determination. It effectively bridges natural hydrological processes and operational decision logic, and offers a transferable, data-driven approach for hydrological response analysis and refined management in complex plain tidal river networks under engineering regulation.

Keywords: Taipu Sluice; principal component analysis; precipitation and water level response; K-means clustering; plain tidal river network

太湖流域地处长江三角洲南翼，地跨江苏、浙江、安徽、上海三省一市，总面积约 3.69 万 km²，河网纵横交错，为典型的平原河网感潮地区。作为长三角区域一体化与长江经济带两大国家战略的交汇区，流域内人口密集、经济发达，其水安全保障对区域高质量发展具有战略意义[1]。太浦河作为太湖流域的骨干行洪通道与跨区域水资源调配载体，兼具承泄太湖洪水、消纳区域涝水及向上海市等下游地区输供优质水源等多重功能，是流域防洪安全的关键“高速通道”与水资源配置的重要“清水走廊”[2]。太浦闸作为太浦河的首级控制节点，其流量调度直接决定太湖洪水下泄与向下游供水，是实现流域防洪、供水、水生态多目标协同调控的核心工程节点，具有防洪保安全与水资源保护相协同的复合功能特征[3]。因此，解析太浦闸流量的多因素驱动机制，并在此基础上识别关键调度阈值，是优化流域水旱灾害防御与水资源配置体系，保障太湖流域水安全的关键技术支撑。

太浦闸的流量过程并非单纯的自然水文过程，而是融合了自然水循环与人为调度干预的复杂耦合系统，本研究聚焦于地面水文站网观测要素，太浦闸的流量具备双源驱动特性：一是自然水文驱动源，包括区域降水径流效应、上下游水力梯度（如上游太湖来水与下游潮位顶托），二是工程调度驱动源，闸门启闭直接受防洪、供水、水生态多目标调度决策影响，调度逻辑已深度嵌入流量过程[4]。从水力学基本原理来看，太浦闸出流受控于上下游水位差与闸门开启状态，然而，在平原感潮河网区，出流存在较大的动态不确定性，上游受太湖来水影响，下游水位在区域产汇流与潮汐顶托的共同作用下持续波动，而闸门开启状态，又是在综合考虑防洪安全、供水需求和生态保护等多重目标后的决策输出。因此，太浦闸的流量过程，实质上是以上下游水位差为核心，多重水文要素协同变化，多目标调度逻辑的动态介入等共同形成的复杂响应系统。太浦闸作为流域控制性工程，其流量精准调控的前提在于对双源驱动机制的深度解析、并识别出触发调度规则响应的关键阈值。然而，现有研究对两类驱动因素的协同与拮抗效应缺乏定量刻画，对降水、水位、流量之间的响应阈值识别不足，导致调控决策缺乏明确的机制支撑。如何揭示太浦闸流量在多因素驱动下的响应规律，并识别触发调度规则响应的关键阈值，是当前亟待解决的核心科学问题。

传统方法应用于太浦闸流量响应分析时主要面临三方面局限：一是对驱动机制解析不足，现有水文水动力学耦合模型[5]与专家经验法，缺乏对复杂水文过程的差异化描述能力[6]，且模型结构多基于特定水文情景构建，难以适应不同调度模式下的驱动机制转换，导致模型在应对多样化水文情景时表现出适应性不足与稳定性欠佳等问题[7]。由于对各类驱动因子（降水、上游来水、区间入流、下游潮汐顶托）的敏感性及相对贡献缺乏定量化解析，导致关键物理机制与权重关系不明确，制约了机制理解与阈值识别。

二是关键变量间的动态互馈机制不清，太浦闸流量与下游关键调度节点平望水位之间存在复杂的动态互馈[8]，太浦闸泄流直接决定平望的水力边界，平望水位变化通过顶托效应反向影响太浦河出流条件；互馈过程兼具确定性与随机性特征，其作用强度随水文情景和调度模式动态变化，现有研究对量化表征与情景分析缺乏深入解析。三是缺乏数据驱动的太浦闸精准调度阈值识别体系，包括太湖—平望水位差驱动下的泄流响应关系、区分随机性与确定性过程的水位变幅阈值，以及触发平望水位显著变化的降水阈值等，目前尚未建立系统性的数据驱动阈值识别方法，难以形成具有明确物理依据与先导性的调度决策支持，制约了太浦闸精细化自适应调度。本研究聚焦于太湖高水位（>3.80 m）情景下的调度响应问题，重点解析该情景下双源驱动机制与流量响应规律，太湖低水位（≤3.80 m）情景下的供水保障与生态协同调控，涉及不同的主导机制与调度逻辑，可作为今后研究的重要方向。

近年来，数据驱动方法为应对上述挑战提供了新途径[9-]，主成分分析[14]、聚类分析[15]等方法在洪水过程分析中取得了一定进展[16]，但仍存在信息冗余[17]、分类偏差[18]与计算效率偏低[19]等局限性[20]。因此，如何耦合主成分分析与聚类分析等方法，协同解析太浦闸流量过程中自然机制与调度逻辑的复杂耦合关系，并定量识别降水水位响应的关键阈值，仍是当前亟待解决的关键科学问题。针对上述问题，本研究系统解析影响太浦闸流量的多因素驱动机制，量化关键因子的贡献，揭示太浦闸流量对关键因子的响应规律，揭示流量对水力梯度的响应规律，并在此基础上识别降水水位阈值，最终形成服务于太浦闸精细化调控的机制认知体系与阈值判别工具。本研究首先基于主成分分析法，对降水、水位等多维特征进行降维处理与信息解耦，在消除变量冗余的同时提取具有显著物理意义的主成分，从而识别并量化影响太浦闸流量的多因素驱动因子的贡献率、明确其关键调控要素；在此基础上揭示太浦闸流量与区域水位的动态响应关系。聚焦太浦闸与下游平望水位间的动态互馈机制，针对降水诱发平望水位显著抬升的临界阈值识别问题，采用校正随机率与 *K*-means 聚类方法的降水阈值计算方法，通过轮廓系数优化方法，动态确定最佳聚类数，从历史降水水位响应序列中识别不同区域前期降水影响下平望水位的驱动阈值，最终构建适用于区域水位动态预警与太浦闸精细化协同调度的双阈值判别体系。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域概况

研究区域为典型的平原河网感潮区，水流运动受潮汐往复、闸泵工程调控及河网调蓄作用共同影响。为系统解析太浦闸流量的多因素驱动机制，本研究选取了流域内五个关键水文站点（图 1）共同构成了上游来水、近闸控制、区域汇流、下游边界的完整监测链条。其中：太湖平均水位为望亭（太）、大浦口、小梅口、夹浦和洞庭西山 5 个水位站的算术平均值，作为来水驱动与太浦闸调度决策的首要依据[21]。离太浦闸最近的下游水位站为平望站，位于太浦河下游约 12.8 km 处，是反映太浦闸水力状态的核心断面，水位变化综合体现了太湖来水、下游潮位顶托及两岸汇流的影响[22]。上游稳定监测点采用太湖流域调度实践中广泛应用的太湖 5 站平均水位，太湖与太浦河连接处虽设有河口站，但因报汛数据质量不稳定而未予采用。自太湖至平望河段无较大支流汇入，河道水力衔接较为连续，故采用太湖平均水位与平望水位构建的水位差，既能反映闸址断面的水力梯度变化，又可规避中间河段汇流与调蓄过程引入的附加不确定性。王江泾站与陈墓站分别表征太浦河南岸杭嘉湖区与北岸阳澄淀泖区的区域水情，其水位波动反映了侧向汇流，在区域排涝与太浦闸泄洪叠加时，其水位变化会进一步影响平望段的水流条件，形成复杂的水力联动，是支撑太浦闸精细化调度与多目标决策的关键依据；位于黄浦江干流的米市渡站[23]代表下游潮汐顶托边界[24]，通过影响河道水力坡降间接调控太浦闸泄流能力。

数据来源于太湖流域管理局水文局（信息中心）报讯水文资料，涵盖太浦闸日均流量及 7 个关键水文气象变量的日尺度观测序列，所有资料均经过测站、省市、流域机构三级共同复审，确保数据质量可靠。为适配不同分析方法对研究目标的要求，采用了差异化的数据时段设置，其中：主成分分析与变量重要性评估用于识别长期稳定的多因素驱动因素，需要覆盖丰、平、枯等多种水文年型，故采用 2020—2025 年完整 6 年日尺度序列。多元回归建模聚焦太湖水位超过 3.80 m（警戒水位）调度情景，根据统计，2020—2025 年，太湖水位超过 3.80 m 的日数分别为：2020 年 44d 、2021 年 30 d、2022 年 0 d、2023 年

0 d、2024 年 16 d、2025 年 5 d。其中，仅 2020 年形成连续 44d 的完整高水位过程，样本连续、调度逻辑一致，是建立稳定统计关系的最优样本；其余年份的高水位事件多为分散、短历时过程，受不同水文情景与调度规则影响不适宜单独建模，但用于年际稳定性验证，因此，本研究选取 2020 年高水位期间的 44d 连续日尺度数据作为建模样本，采用留一法交叉验证评估模型稳健性，为进一步验证该关系的年际普适性，采用 2020—2025 年全部高水位样本（共 95d）进行长系列验证。校正随机率分析与聚类阈值识别用于当前调度预警，要求数据连续、近期、无缺失，并能反映近年来下垫面与调度规则变化下的响应特征，根据防汛实地调研，2020—2022 年期间，杭嘉湖平原及阳澄淀泖区圩区整治工程仍处于集中实施阶段，圩区格局、堤防标准、排涝能力及区域调度边界条件均存在阶段性调整，下垫面条件尚未稳定；自 2023 年起，区域圩区整治主体工程基本建成，圩区防洪除涝工程体系趋于定型，区域调度规则与工程运行条件进入相对稳定期，因此采用 2023—2025 年连续 1096d 日观测数据，并以 2023—2024 年为训练集、2025 年为测试集，验证阈值的时序泛化能力。

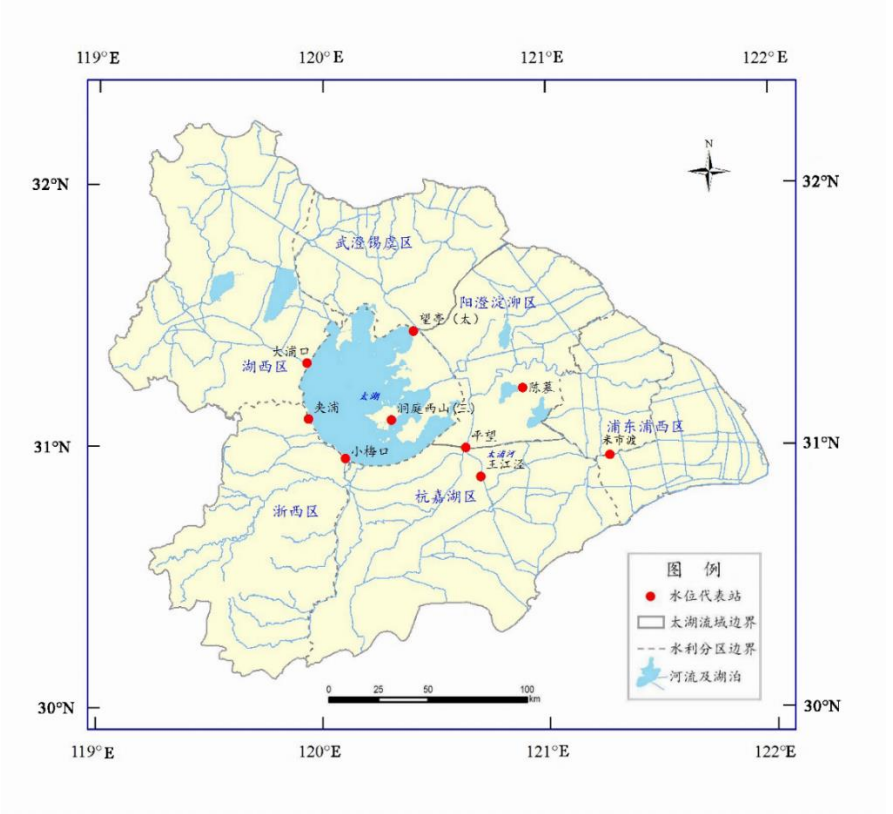

图 1 研究区域与水位代表站

Fig. 1 Study area and representative water level stations

1.2 主成分分析

主成分分析通过正交线性变换将具有相关性的高维水文指标（如水位、降水等）转换为一组线性不相关的低维主成分[25]，在保留数据集中绝大部分变异信息的前提下，实现了数据降维与特征提取，有助于从众多自变量中识别出影响目标变量的主要综合驱动因子[26]，从而将复杂的多变量问题转化为少数具有明确物理意义的主成分问题[27] 。各主成分所解释的方差比例由其特征值在总特征值之和中的占比决定，累积解释方差比例则为前若干主成分解释比例的累加。在进行主成分分析前，需对数据的适用性进行检验[28]，主要包括 KMO 检验和 Bartlett 球形检验[29]。

1.2.1 KMO 与 Bartlett 适用性检验　KMO 检验用于评估变量间的偏相关性[30]，Bartlett 球形检验则用于

检验变量相关矩阵是否为单位矩阵[31]。$\boldsymbol{KMO}$值介于 0 与 1 之间，值越高，表明变量间的共同因素越多，数据越适合进行主成分分析，$\boldsymbol{KMO}$值达到 0.7 以上适合主成分分析，当$\boldsymbol{KMO \geq 0.9}$，非常适合；$\boldsymbol{0.8 \leq KMO < 0.9}$，适合；$\boldsymbol{0.7 \leq KMO < 0.8}$，一般适合，$\boldsymbol{KMO < 0.7}$，不适合。Bartlett 球形检验中，若$\boldsymbol{\chi^2}$大于卡方分布临界值，则认为变量相关矩阵不是单位矩阵，变量间存在显著相关性，适合进行主成分分析。

1.2.2 主成分计算与方差解释　主成分选取采用累积方差解释率准则（保留 80%以上的原始信息）与 Kaiser 准则实现数据降维[32]，主成分荷载矩阵直接采用特征向量矩阵，荷载矩阵用于解释各主成分的物理意义[33]。变量总重要性得分越高[34]，表明该变量通过主成分结构对因变量的影响越显著[35]。

原始变量x_j的重要性得分I_j通过其在各主成分上的荷载与对应主成分回归系数的乘积绝对值之和计算[36]：

$$I_j = \sum_{m=1}^{M} | a_{jm} \cdot \beta_m | \tag{1}$$

中，I_j为重要性得分，a_{jm}为原始变量x_j在第m个主成分上的荷载系数，β_m为第m个主成分的回归系数。

1.3 校正随机率法

校正随机率法通过设定水位变化幅度阈值划分为扰动强度区间[37]，结合数据离散度与相关性的加权综合指标，计算 MST 指标量化不同变化强度下系统随机性[38]。

1.3.1 数据分组与标准化　设原始日水位观测序列为$\mathbf{Z} = \{\boldsymbol{Z_1}, \boldsymbol{Z_2}, \ldots, \boldsymbol{Z_n}\}$，其中$\boldsymbol{n}$为观测天数，水位日际变化序列为：

$$D_t = Z_t - Z_{t-1}, \qquad t = 2,3, \ldots, n \tag{2}$$

式中，D_t为第t日的水位变化量。

设定阈值T，依据水位变化绝对幅度将序列划分为两个互斥子集（小涨幅组G_s、大涨幅组G_l）：

$$d_{g,i}^{norm} = \begin{cases} \dfrac{D_{g,i} - \mu_g}{\sigma_g}, & if\ \sigma_g > 0 \\ 0, & if\ \sigma_g = 0 \end{cases} \tag{3}$$

中，$d_{g,i}^{norm}$表示第g组第i个水位变化量的标准化值，$g \in \{s, l\}$表示组别；μ_g为组内均值；σ_g为组内标准差。

计算标准化数据到分布中心的距离：

$$\mathrm{dist}_{g,i} = \left| d_{g,i}^{norm} - \bar{d}_g^{norm} \right| \tag{4}$$

式中，$\bar{d}_g^{norm}$为标准化后序列的均值。

1.3.2 特征提取与加权综合　计算距离序列的变异系数$\boldsymbol{CV_g}$：

$$CV_g = \begin{cases} \dfrac{\sigma(\mathrm{dist}_g)}{\mu(\mathrm{dist}_g)}, & if\ \mu(\mathrm{dist}_g) > 0 \\ 0, & otherwise \end{cases} \tag{5}$$

中，$\mu(\mathrm{dist}_g)$和$\sigma(\mathrm{dist}_g)$分别为距离序列的均值和标准差。变异系数经过归一化处理后得到CV_g^{norm}，综合离散度特征与相关性特征，采用加权平均法计算各组的 MST 值：

$$\mathrm{MST}_g = 0.7 \times CV_g^{norm} + 0.3 \times I_{corr,g} \tag{6}$$

各阈值下的 MST 差异指数$\Delta\mathrm{MST}^{(k)}$：

$$\Delta\mathrm{MST}^{(k)} = \mathrm{MST}_s^{(k)} - \mathrm{MST}_l^{(k)} \tag{7}$$

择使$\Delta\mathrm{MST}^{(k)}$达到最大值的阈值作为最优阈值，计算最大化组间 MST 差异[39]，从而建立客观稳健的分类边界。MST 指标是用于量化系统在不同扰动强度下随机性与确定性过程相对主导程度的综合指数，取值范围为$[0, 1]$，当 MST<0.5 表明确定性过程占主导作用，MST≥0.5 表明随机性过程占主导作用。该指标综合了数据离散度（变异系数）与相关性特征，能够在不同水位变幅条件下客观评估系统的随机性程度。

1.4 聚类分析

本研究采用 K-means 聚类算法[40]，以平望水位差与前期降水量构建的二维特征空间为基础进行自动分类[41]。选取轮廓系数最大对应的 K 值作为最佳聚类数。

1.4.1 数据集划分　$\boldsymbol{\Delta W_i}$为第$\boldsymbol{i+1}$日 8:00 相对于第$\boldsymbol{i}$日 8:00 的水位变幅，$\boldsymbol{R_i}$为第$\boldsymbol{i}$日降水量。设定判别阈值$\boldsymbol{\tau_w}$，将连续的水位变化量转换为离散的二元分类标签：

$$c_i = \begin{cases} 1, & \text{if } \Delta W_i > \tau_w \\ 2, & \text{if } \Delta W_i \le \tau_w \end{cases}, \quad i = 2,3,\dots,N \tag{8}$$

式中，c_i为第i个样本的类别标签，类别 1 表示显著水位变化，类别 2 表示非显著水位变化。

K-means 算法旨在将N个样本划分为K个簇，使得同一簇内的样本具有较高的相似性，而不同簇间的样本具有较大的差异性。

1.4.2 质量量化评估　轮廓系数通过量化样本的簇内凝聚度与簇间分离度来综合评价聚类质量[42]，计算公式为：

$$s(t) = \frac{b(t) - a(t)}{max\{a(t), b(t)\}} \tag{9}$$

中，$s(t)$样本t的轮廓系数，$a(t)$为簇内凝聚度；$b(t)$为簇间分离度。

整体聚类效果的轮廓系数为所有样本轮廓系数的算术平均值，取值范围为$[-1,1]$。其值越接近 1 表示聚类效果越好，簇内样本越紧密，簇间分离越明显；若接近-1 则表示聚类效果差，样本划分可能存在较大错误；接近 0 表明簇间存在明显重叠，聚类结构不清晰。

2 结果与分析

2.1 影响太浦闸流量的多因素驱动机制解析与变量重要性评估

主成分分析法采用 2020—2025 年共 6 年的日尺度序列，覆盖了丰、平、枯不同水文年份，能够较为全面地反映流域水文要素的协同变化特征。为确定流量模型的核心输入变量，研究了影响太浦闸日均流量的 7 个关键水文气象因子（平望 8:00 水位、太湖 8:00 水位、王江泾 8:00 水位、陈墓 8:00 水位、米市渡前一日高潮位、阳澄淀泖区前一日降水量、杭嘉湖区前一日降水量）。经过 KMO 和 Bartlett 检验，结果表明 KMO 值为 0.9674，Bartlett 检验χ^2值为 10499，p 小于 0.001，说明变量之间存在显著的相关性，可以进行主成分分析。

本研究采用荷载表示原始变量与主成分之间的相关性强度，其绝对值越大、越接近 1，说明该变量对该主成分的贡献越大，主成分数量的确定需综合评估各主成分对原始数据变异程度的解释能力。特征值表征各主成分所承载的原始数据变异程度(表 1)显示，前三个主成分的特征值分别为 4.625、1.492 和 0.426，其累计方差贡献率达 93.47%，说明已提取原始变量的绝大部分信息，其中，第一主成分（贡献率 66.07%）占据主导地位，第二、三主成分分别贡献 21.31%和 6.09%（图 2（a，b）），三者共同揭示了影响太浦闸流量的核心驱动因素及其相互作用关系。本研究采用碎石图（图 2（c））验证所选主成分数量的合理性，自第三主成分开始，特征值明显下降并趋于平缓，表明前三主成分可以有效表征数据的主要变异结构。

表 1 主成分分析总方差解释表

Tab.1　Total variance explained by principal component analysis

成分	特征值	贡献率（%）	累积贡献率（%）
主成分 1	4.625	66.07	66.07
主成分 2	1.492	21.31	87.38
主成分 3	0.426	6.09	93.47

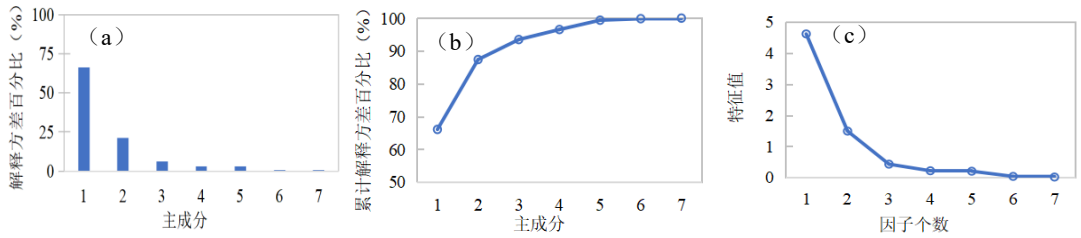

图 2　主成分分析可视化：(a) 解释方差百分比；(b) 累计解释方差百分比；(c) 碎石图

Fig.2 Visualization of principal component analysis: (a) percentage of explained variance; (b) cumulative percentage of explained variance; (c) scree plot

第一主成分主要反映了区域河网代表站水位综合状况，荷载最高的三个变量为（图 3）：平望 8:00 水位（0.45）、王江泾 8:00 水位（0.45）和陈墓 8:00 水位（0.44），三站水位变化具有显著的协同效应，共同反映了区域河网的蓄泄状态，是影响太浦闸下泄流量的主导因素。第二主成分体现了降雨径流效应，该成分上荷载最高的两个变量分别为杭嘉湖区降水量（0.68）和阳澄淀泖区降水量（0.64），说明杭嘉湖区、阳澄淀泖区的降水在产流、汇入河网的过程中具有协同性，共同通过对太浦闸流量产生正向影响。第三主成分表征了流域上下游水位相互作用，该成分上米市渡高潮位（0.88）、太湖 8:00 水位（-0.42）均呈现较强的荷载，说明上游太湖水位与下游潮位顶托之间存在一定的拮抗关系，两者对太浦闸流量的影响作用方向相反。

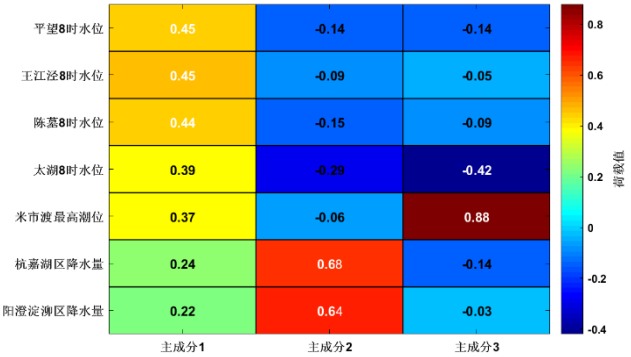

图 3　关键变量在前三主成分上的荷载热力图

Fig.3 Heatmap of key variable loadings on the first three principal components

为揭示水文多要素在降维空间中的内在结构特征，并识别其主导变化模式，本研究基于主成分分析方法构建了杭嘉湖区降水量、太湖水位与平望水位三变量的双坐标荷载图（图 4）。以第一主成分为横轴，第二主成分为纵轴，二者构成正交特征空间，坐标值为标准化得分，变量以箭头表示其在主成分空间中的荷载方向与强度。从荷载分布来看，三个变量在第一主成分上均表现出较高的正向荷载，说明第一主成分可作为反映流域与区域水量整体波动的协同因子，样本点沿横轴分布较为分散，说明该成分对水文多要素异质性具有较强解释力。在第二主成分上，各变量荷载方向与强度存在较大差异，杭嘉湖区降水量箭头指向右上方（正荷载），太湖、平望水位箭头指向右下方（负荷载），说明降水与水位响应之间具有一定的时空异质性。

本研究选择杭嘉湖区降水量、太湖水位与平望水位三变量进行双坐标荷载可视化，第一主成分和第二主成分共同解释了 87.38%的数据变异，是刻画区域水位协同与降水径流效应的主导维度。平望水位作为第一主成分的核心变量（荷载 0.45），太湖水位同时参与第一主成分（荷载 0.39）和第三主成分（荷载-0.42），杭嘉湖区降水量是第二主成分的核心变量（荷载 0.68），三者能够有效展示的主导维度变量关系。而米市渡高潮位在第一、第二主成分上的荷载相对较低，若纳入图中，箭头将靠近原点，难以有

效呈现其作用，在第三主成分上的高荷载已在荷载热力图中展示。

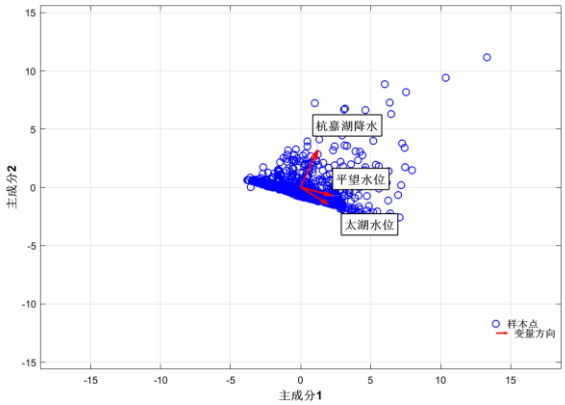

图 4 基于主成分分析的水文变量双坐标荷载分布图

Fig.4 Biplot of hydrological variable loadings based on principal component analysis

在解构了主成分荷载的物理意义之后，为量化各水文气象变量对太浦闸流量的差异化驱动贡献，本研究通过主成分回归进行变量重要性评估，原始变量通过其荷载构建主成分特征空间，而主成分则通过回归系数与太浦闸流量建立关联，从而实现从原始变量到主成分再到目标变量的作用路径的解析。各变量重要性得分及排序为(图 5)：平望 8:00 水位（379.76）、王江泾 8:00 水位（364.48）、陈墓 8:00 水位（124.16）、太湖 8:00 水位（93.19）、米市渡高潮位（60.54）、杭嘉湖区降水量（47.11）、阳澄淀泖区降水量（33.33）。排序验证了主成分分析中区域河网水位是流量调控关键驱动力的结论，后续流量模型优先考虑平望、王江泾、陈墓三站水位作为核心输入变量。

尽管从数据降维角度看，第三主成分特征根为 0.426（<1），贡献率仅 6.09%，解释的总体方差有限；然而，该主成分在太湖水位与米市渡高潮位上均呈现高荷载，反映了原始变量与主成分之间的强相关性，揭示了上下游水位的拮抗关系。变量重要性得分排序与主成分贡献率排序并非简单的对应关系，变量重要性得分是变量在各主成分上的荷载与对应主成分回归系数乘积的绝对值之和；太湖水位除在第三主成分上荷载较高（-0.42）外，在第一主成分上亦有一定荷载（0.39），其重要性得分（93.19）来自第一、第三主成分的共同贡献；而杭嘉湖区降水变量虽在第二主成分上荷载较高（0.68），但该主成分回归系数相对较小，重要性得分低于太湖水位，变量重要性评估表明了太湖水位与米市渡高潮位对太浦闸流量的重要贡献。因此，上下游水位拮抗机制（第三主成分）虽解释的数据总变异有限，但对太浦闸流量仍具有显著的直接影响，在调控决策中不可忽视。

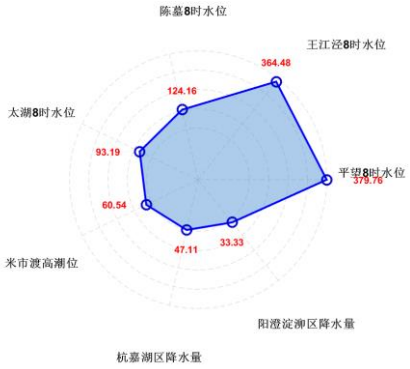

图 5 变量重要性得分

Fig.5 variable importance scores

2.2 太浦闸流量对调度多要素的响应与模拟简化

为进一步解析太浦闸流量对调度多要素的响应特征，基于图 6 的相关系数矩阵进行变量筛选与模型简化。平望、王江泾、陈墓三站水位之间存在强相关性（$r > 0.97$），太湖水位与三站水位也呈较强的相关性，相关系数介于 0.80～0.86，说明太湖流域水系的高度连通性与系统性响应，形成了稳定的协同变化格局。杭嘉湖区降水量与阳澄淀泖区降水量之间存在较强的相关性（$r = 0.78$），与水位之间的相关性高于与太浦闸流量的相关性，说明降水抬升了区域水位以后，受汇流延时、调度干预等多重因素影响，导致日尺度上降水与太浦闸流量统计关联不显著。

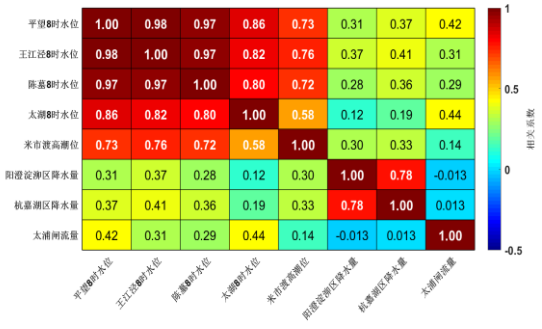

图 6 相关系数矩阵

Fig.6 correlation coefficient matrix

位于下游的米市渡高潮位与太浦闸流量的相关系数较低，可能与空间距离与调度逻辑有关。一是潮汐作用存在时空衰减效应，米市渡距离太浦闸较远，潮波沿黄浦江、太浦河向上游传播过程中能量逐渐耗散、相位滞后。二是在现状运行规则下，太浦闸调度在耦合自然水动力与工程调控的过程中，体现出以流域蓄泄平衡为核心、以近闸水文响应为主导、以潮汐边界为约束的运行特征，侧重于响应上游太湖来水及近区关键站平望水位变化，下游潮汐顶托作为边界条件被纳入综合研判，其影响更多体现在特征水位阈值（如警戒水位）控制等约束层面。

为初步筛选影响太浦闸流量的关键变量，本研究采用递进式变量纳入策略，系统建立了四个多元线性回归模型。模型序列从仅包含平望、王江泾、陈墓三站 8:00 水位的 3 变量模型出发，依次增加太湖 8:00 水位形成 4 变量模型，增加米市渡高潮位形成 5 变量模型，增加阳澄淀泖区降水量与杭嘉湖区降水量构建 7 变量完整模型(图 7)。通过对比分析不同复杂度的模型性能，定量解析流域蓄泄平衡、潮汐顶托与降水产流等多过程的耦合贡献，进而实现因子筛选。

模型对比结果表明，7 变量完整模型的解释能力最佳（决定系数$R^2 = 0.62$，均方根误差$RMSE = 51.5$，平均绝对误差$MAE = 38.2$），当模型简化至 3 变量模型时，其性能衰减有限，R^2仅下降了 1.5%（决定系数R^2降至 0.61），$RMSE$与MAE均增加了 2.0%。上述分析表明，平望、王江泾、陈墓三站水位所含的水文信息已能解释太浦闸流量 60%以上的变化；而米市渡潮位及区域降水量等因子所提供的边际信息增益有限。3 变量模型为变量筛选提供了参考依据，但三站水位之间存在强相关性，直接纳入多元回归会引发多重共线性问题，导致回归系数估计不稳定，不宜作为最终建模变量。

前文基于长时序资料进行重要性评估，从统计层面确定了代表站水位在驱动太浦闸流量中的重要作用。为深入理解水力驱动关系，并掌握关键调度阈值下的具体响应规律，需要聚焦太湖高水位调度情景。根据《太湖流域洪水与水量调度方案》，太湖警戒水位 3.80m 是启动防洪调度与太浦闸加大泄量的重要参考阈值。因此，本研究聚焦 2020 年典型洪水年太湖水位超过 3.80 m 的 44d 连续过程，揭示高水位情境下驱动太浦闸流量产生的水力梯度的主导机制。由于样本量有限，本研究采用留一法交叉验证，依次将每个样本作为验证集、其余 43 个样本作为训练集，共进行 44 次建模与验证，最终以 44 次验证结果的平均值作为模型性能的综合评价指标，在保证模型评估稳健性的同时，也为有限样本条件下的水文建模

提供了可借鉴的技术路径。留一法交叉验证结果显示，模型在 44 次验证中决定系数为 0.60，表明模型在有限样本条件下仍保持了良好的稳健性与泛化能力。

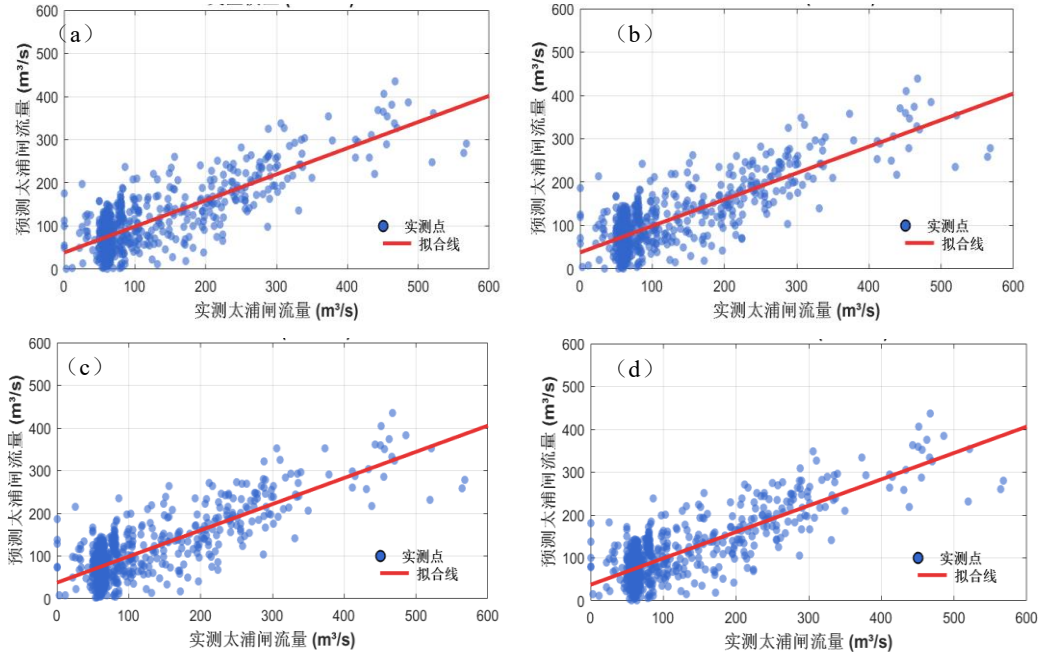

图 7　（a）3 变量、（b）4 变量、（c）5 变量、（d）7 变量模型

Fig.7 Models with (a) three, (b) four, (c) five, and (d) seven variables

基于上述变量筛选结果与共线性分析，本研究进一步构建具有明确物理意义的派生变量（太湖—平望水位差），既承载了上述水位站的核心水文信息，也不存在共线性问题，且符合闸孔出流的水力学原理。在太湖水位超过 3.80 m 的调度阈值条件下，太浦闸日均流量与太湖与平望 8:00 水位差（ΔH_{TH-PW}）呈现高度线性正相关关系，说明具有强水力驱动关系，其定量关系可表述为：

$$Q_{tpz} = 1041\Delta H_{TH-PW} + 129.74,\ R = 0.92 \tag{10}$$

式中，Q_{tpz}为太浦闸日均流量（m³/s），ΔH_{TH-PW}为太湖与平望水位差（m）。

太湖高水位期间，太浦闸泄流主要受控于沿程水力坡降这一基本水力学原理，不仅从物理机制上验证了平望水位在变量重要性排序位居前列的内在原因，也揭示了在太湖高水位情景下，太浦闸流量对水位差的敏感响应系数，说明平望是构成上下游水力梯度的核心变量，可为将统计模型升级为具有明确物理意义的、适用于调度决策的水位差与流量模拟模型提供了关键参数。

为进一步验证 2020 年高水位情景下识别的太湖—平望水位差与太浦闸流量呈强线性关系结论的普适性，本研究采用 2020—2025 年完整 6 年日尺度数据序列（共 2192d）对该关系进行统一验证。将全部样本按照太湖水位是否超过 3.80 m 划分为高水位组（太湖水位＞3.80 m，N=95d）和常水位组（太湖水位≤3.80 m，N=2097d），分别分析太湖—平望水位差（ΔH_{TH-PW}）与太浦闸流量（Q_{tpz}）的相关关系。在高水位组中，ΔH_{TH-PW}与Q_{tpz}仍呈现显著的线性正相关关系，相关系数$R = 0.90$，回归方程为：

$$Q_{tpz} = 1059.3\Delta H_{TH-PW} + 109.6 \tag{11}$$

该结果与 2020 年分析一致，表明高水位情景下该关系的年际稳定性，常水位组中相关性明显减弱（$R = 0.04$），印证了太湖—平望水位差是驱动太浦闸流量的核心水力梯度的结论，在高水位情景下具有高度的普适性和年际稳定性；而该关系的强弱与太湖水位高低密切相关，非高水位时期，太浦闸流量除受水力梯度影响外，还受到供水调度、生态约束等多目标调度因素的共同作用，水位差的驱动作用受其他因素影响，体现了不同调度情景下主导机制的差异性，验证了本研究聚焦高水位情景进行建模的合

理性。

为进一步论证选择太湖—平望水位差的合理性，本研究对比分析了太湖水位与三站（平望、王江泾、陈墓）水位差对太浦闸流量的解释能力。基于 2020—2025 年长系列数据，分别计算太湖与三站 8:00 水位差（ΔH_{TH-PW}、ΔH_{TH-WJJ}、ΔH_{TH-CM}），并分析其与太浦闸流量（Q_{tpz}）在高水位组和常水位组中的相关关系。结果表明：在高水位组中，太湖—平望水位差与流量的相关系数最高（$R = 0.90$），显著优于太湖—王江泾（$R = 0.69$）和太湖—陈墓（$R = 0.65$）。由此可见，平望站是太浦河干流的直接控制断面，其水位直接参与构成太浦闸泄流的水力梯度；而王江泾、陈墓分别位于太浦河南北两岸支流，其水位反映区域侧向汇流条件，与干流水力梯度的关联相对间接。在常水位组中，三站水位差与流量的相关系数均较低（0.04～0.16），说明非高水位时期，太浦闸流量受供水调度、生态约束等多目标因素影响，水力梯度的主导作用降低，与前文结论一致。

本研究构建的流量模型具有明确的物理基础，根据闸孔出流水力学公式，过闸流量与上下游水位差及闸门开度相关，上游太湖水位和下游平望水位均为流量计算的关键输入变量，具备水力学理论支撑。通过相关分析、回归建模、简化验证的分析框架，不仅契合流域水循环的物理机理，也兼顾了调度模型对稳健性与时效性等需求，在模型复杂度与精度之间取得了有效平衡，为太湖流域平原感潮河网地区复杂水工程调度下水文模拟提供了可推广的变量筛选范式。

2.3 多源驱动下太浦闸调度关键阈值识别

在平原感潮河网区，水位响应受确定性水力梯度与降水、闸泵调度等随机因素共同影响。识别太湖—平望水位差驱动下的泄流响应关系、区分随机性与确定性过程的水位变幅阈值，以及触发平望水位显著变化的降水阈值，是实现太浦闸精准调控的关键科学问题。为此，本研究采用校正随机率法与 K-means 聚类方法，分析太浦闸流量与平望水位日际变化的随机性特征，识别降水驱动平望水位显著变化的临界条件与响应阈值。

基于上述数据，分析了太浦闸流量与平望 8:00 水位日际变化之间的随机性特征。平望水位日际变化（$|\Delta Z_{PW}|$）介于-0.25～0.67 m 之间，均值为 0.0002 m，标准差为 0.06m，说明研究时段水位变化较平稳。为识别可用于区分随机性与确定性过程的水位变化阈值，开展了阈值敏感性分析，对 0.20、0.15、0.12、0.10 和 0.05 m 五个候选阈值进行评估。结果表明，当阈值为 0.20 m 时，两组随机性校正值差异最大（0.162），但日际大变化组样本仅 12 个，占总样本 1.1%，统计代表性不足。随着阈值降低至 0.15 m、0.12 和 0.10 m，日际大变化组样本量分别增至 26 个（2.4%）、37 个（3.4%）和 60 个（5.5%）；而当阈值进一步降低至 0.05 m，两组数据呈现随机性与确定性混合特征，无法有效区分。

鉴于样本量过少会显著影响统计稳定性，最终选定 0.10 m 作为分析阈值，该值在统计可靠性、工程调度实际意义等方面均较为合理。基于 0.10 m 阈值，日际小变化组（$|\Delta Z_{PW}| < 0.10$ m）包含 1036 个样本，随机性校正值为 0.518；日际大变化组（$|\Delta Z_{PW}| \geq 0.10$ m）样本量为 60，随机性校正值为 0.481，两组差异为 0.037，表明日际小变化情境下随机性更强，日际大变化情境下确定性相对明显。从样本分析可见，日际水位小幅波动主要受水位自然涨落等随机过程控制，而大幅变化则由系统性降水事件主导驱动，当日际水位变幅≥0.10 m 时，系统由随机波动主导向确定性水文过程主导发生转变；临界阈值 0.10 m 以内的水位变化主要由随机因素贡献，超过临界阈值 0.10 m 的水位变化反映了对强降水的响应，代表确定性水文信号。因此，0.10 m 可作为区分流域水文系统稳态随机波动与外强迫驱动响应的关键阈值。

平望站水位日际变化与杭嘉湖区、阳澄淀泖区前一日降水量之间存在统计相关性，表明区域降水是影响太浦闸近闸控制断面水位波动的重要外强迫因子。本研究基于平望水位日际变化定义两类响应模式：类别 1 对应日际小幅变化（$|\Delta Z_{PW}| < 0.10$ m），类别 2 对应日际显著变化（$|\Delta Z_{PW}| \geq 0.10$ m），在兼顾调度意义与统计可靠性的基础上，形成后续聚类分析的标签。

为评估并提取区域降水影响平望水位变化的阈值，本研究采用 K-means 聚类分类方法。对杭嘉湖区前一日降水序列进行聚类分析，当聚类数 K=2 时轮廓系数达 0.9275，显示降水数据具有明显的二分类结构。基于聚类结果训练的分类在测试集上表现稳健，总体分类准确率为 94.34%，其中对高降水量样本（类别 2）的识别尤为准确。经类别分布验证，以 28.3 mm 为划分阈值时分类效果最优，此时降水量≤

28.3 mm 的样本主要归属类别 1（日际小幅变化），而降水量＞28.3 mm 的样本则多属类别 2（日际显著变化），该阈值下的总体分类准确率达 95.8%(图 8（a）)。

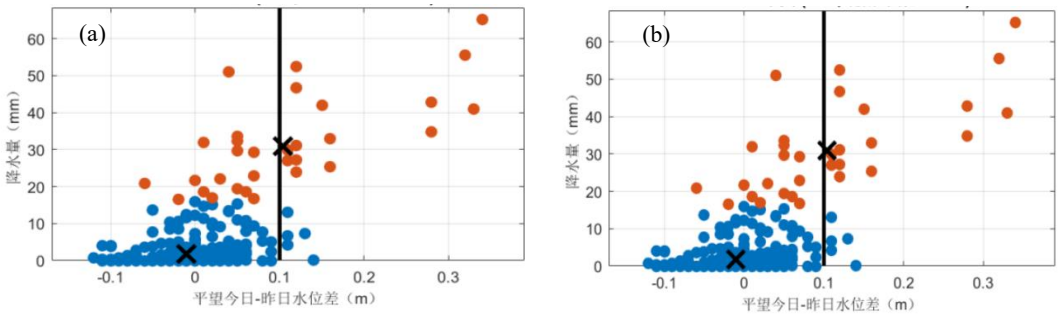

图 8 杭嘉湖区（a）、阳澄淀泖区（b）降水量聚类（蓝点表示类别 1，红点类别 2）

Fig.8 Precipitation clustering in the Hangjiahu area (a) and Yangchengdianmao area (b) (blue dots represent cluster 1, red dots represent cluster 2)

对阳澄淀泖区前一日降水序列进行类似分析，最佳聚类数 K＝2 对应的轮廓系数为 0.9252，表明该区降水同样具备清晰的二分特征。基于聚类标签构建的模型在测试集上达到 96.2%的分类准确率。模型识别出多个候选阈值，经综合比较，以 21.7 mm 作为该区域影响平望水位变化的降水阈值，其分类准确率为 93.5%，见图 8（b）。该值与杭嘉湖区阈值（28.3 mm）较为接近，反映出两区域降水驱动水位变化具有相似的量级响应特征，但也体现了空间异质性。与此前的相关分析结论基本一致，即两区降水量之间具有较强相关性（r＝0.78），存在协同影响机制。

综上，28.3 mm（杭嘉湖区）与 21.7 mm（阳澄淀泖区）可分别作为两区前一日降水量触发平望水位显著变化（$|\Delta Z_{PW}| \geq 0.10$ m）的关键阈值。为进一步简化模型中的降水输入并增强其可操作性，将两区前一日降水量进行区域平均后向上取整，设定 25.0 mm 作为综合降水阈值，用于判别平望水位是否发生显著上升。上述水位变幅阈值（0.10 m）与降水阈值（25.0 mm）共同构成了太浦闸调度中的双阈值预警体系，当区域前一日降水量超过 25.0 mm 且平望水位日际变幅预期达到或超过 0.10 m 时，双阈值预警体系触发，标志着系统由稳态波动向受迫响应转换，平望水位进入确定性快速抬升阶段。该临界特征揭示了平原河网区水文系统的非线性响应机制，符合流域降水水位响应规律，可为太浦闸水位预警、防洪调度及模型动态修正提供定量依据。

对于太浦闸流量调控而言，太湖作为上游来水，其水位对流域降水的响应过程同样直接关系到太浦闸的泄流条件与调度决策，受篇幅所限，本文未对此展开分析，而是主要聚焦于平望水位对区域降水的响应阈值识别，后续研究可结合更长序列的太湖水位与流域降水数据，识别太湖水位对降水的响应阈值，并与平望水位阈值共同构建上下游联动的阈值预警体系，进一步提升太浦闸在多情景下的自适应调控能力。

3 讨论

3.1 太浦闸调度实践与挑战

太浦闸自 1959 年建成以来，经历了从单一防洪调度向多目标统筹调度的转变，早期调度为“蓄泄兼筹、以泄为主”的防洪导向[43]。2002 年启动引江济太调水，功能定位扩展至供水保障、水生态改善、水环境修复等多目标协同[44]。2011 年正式实施《太湖流域洪水与水量调度方案》，首次在制度层面将洪水调度与水量调度有机结合[45]，实现了从单一防洪到防洪、供水、水环境治理综合调度的转变，逐步形成了以水位差控制为核心的调度逻辑，并不断向精细化、智能化方向优化，体现了工程调度与流域治理需求动态适应的特点[46]。太浦闸调度主要面临以下挑战，一是多目标统筹协同调度难度大，防洪、供水、水生态等目标在不同水文条件下易产生冲突，尤其在流域防洪与区域排涝、短期泄洪与长期蓄水之间难

以平衡，二是气候变化与极端天气频发加剧了调度不确定性，尤其在应对区域突发性暴雨情景时适应性不足。

本研究通过主成分分析、聚类识别、随机性校正等方法，系统揭示了太浦闸流量多因素驱动机制与阈值响应特征，变量重要性评估验证了水位为核心驱动因子，从数据层面验证了现行调度逻辑的合理性。在太湖高水位情景下，太湖—平望水位差与太浦闸流量呈强线性关系，与实际调度中依据水位差动态调控经验高度契合；提出的降水阈值与水位变幅阈值构成的双阈值预警体系，是对现有调度体系中阈值化管理的进一步量化，为强降水情景下的自适应调度提供了先导性判据，既从数据层面验证了现行调度框架的科学性，也为太浦闸从经验调度向智能调度转型提供了可量化、可移植的技术支撑。由于太浦闸调度为持续优化的过程，在此背景下，本研究既是对历史经验的科学总结，也为太浦闸从经验调度向智能调度转型提供了可量化的技术支撑，可为提升太湖流域多目标统筹调度与科学决策提供重要参考。

3.2 多因素驱动协同机制与建模解释

太浦闸流量是自然水文要素与多目标调度决策共同作用下的复杂响应，主成分分析提取的三个主成分（区域水位协同、降水径流效应、上下游水位拮抗）累计贡献率达 93.47%，表明流量变化由多要素协同驱动、而非单因子主导。区域水位协同反映了平原河网地区蓄泄一体的联动特征，降水径流效应体现了降水空间分布对河网水量的直接影响，上下游水位拮抗反映了太湖水位与下游米市渡潮位之间的动态平衡关系，三者共同构成了一个相互关联、协同影响的水文响应系统。研究成果与罗赟等[47]提出的分区降水与水位联合关系是洪涝风险控制核心的结论一致。同时，与吴浩云等[48]指出引江济太调度以水位协同、降水响应为基础的多过程耦合调控的逻辑互相验证，证实了工程调度中防洪、供水与生态的多目标统筹协调，实质上是水文要素协同机制在管理决策层面的应用。自然水文驱动源（区域河网水位协同、降水径流效应、上下游水力梯度拮抗）与工程调度驱动源（基于防洪—供水—水生态协同的多目标闸控决策）的相互作用，三个主成分对应了调度实践中的关键协同要素，涵盖了自然水循环与人为工程调控的耦合系统分析框架，可为构建基于协同机制的智能调度模型提供依据。

通过变量重要性评估揭示了平望 8:00 水位、太湖 8:00 水位与米市渡高潮位在流量预测中的贡献，与宋琛等[49]提出的水位协同与潮位顶托是工程调度中反映系统整体状态的核心变量的结论相符。本研究揭示了阳澄淀泖区与杭嘉湖区降水的重要性差异，与于志慧等[50]、蒋飞卿等[51]提出的城镇化高速期不同区域的水文协同结构存在异质性研究意见一致，说明在城镇化背景下，必须建立多变量耦合机制才能有效反映流域水文响应。考虑到平望、王江泾、陈墓三站水位之间存在强相关性直接纳入多元回归会引发多重共线性问题，本研究将其作为变量筛选的信息载体，构建了具有物理意义的派生变量（太湖—平望水位差）模型。

平望 8:00 水位以最高得分印证了其在现行调度体系中的核心地位，与《太湖流域洪水与水量调度方案》[52]中以太湖、平望等关键站水位作为调度决策依据的工程逻辑高度吻合，在多站水位协同控制为核心的调度逻辑中，自然水文协同机制通过现行调度体系中的水位控制规则进行应用，从数据驱动角度验证了现有调度框架的科学性。现行调度体系中以多站水位协同控制为核心的逻辑，本质上已包含对河网地区多要素耦合机制的科学考量，与魏鋆鋆等所指出的需通过优化调度以增强河网连通性的需求[53]结论相一致。因此，变量重要性评估不仅从数据层面揭示了蓄泄平衡、降水产流与潮位顶托的耦合机制，也从调度实践层面论证了以关键控制站水位为核心的建模的合理性，为发展基于数据与机理双驱动的精准调度支持模型、推动流域防洪调度向精细化、协同化决策方向发展提供了重要依据。

本研究采用 2020—2025 年长系列数据验证太浦闸流量与太湖—平望水位差关系的年际稳定性，与 2020 年单独分析的结果高度吻合，证明了该水力驱动关系在高水位情景下具有良好的年际稳定性，证实了本研究提出的分情景研究、长系列验证的技术路径，能够在保证机制解析深度的同时，确保结论的普适性。该强线性关系仅适用于太湖水位超过 3.80 m 的高水位防洪调度情景（样本占比 4.33%），对应流域防洪风险最高的关键时期，是调度决策中最需要定量支撑的场景。常水位组弱相关性，反映了多目标调度（供水与水生态保障等）对水力梯度的显著干扰，从反面印证了本研究聚焦高水位情景建模的合理性。常水位下的精细化调度，需进一步引入调度规则挖掘、多目标统筹建模等方法，属于后续研究需要

深化的重要方向。此外，主成分分析与多元回归分别刻画了变量的协同结构与独立贡献，二者统一于平原河网感潮地区纵向驱动、侧向约束的水动力特征，表明在多变量高度相关的复杂系统中，需结合多种方法进行交叉验证，未来研究需针对不同水位情景建立差异化的模拟模型。

3.3 水位流量动态互馈

太浦闸流量与代表站水位之间存在显著的动态互馈关系，既是多源驱动下流量变化的核心特征，也是精准调度决策中的关键机制。自然水文要素（降水、潮汐顶托）与工程调度决策（闸控）的协同作用，共同构成了互馈关系的核心驱动因子。从预报应用来看，本研究中模型关键在于输入变量的可获得性，可通过水文水动力学模型或数据驱动模型耦合定量降水预报实现。当前数值降水预报在 0—7 天预见期内已具备较高参考价值，模型预见期与预报精度主要取决于水位预报能力。经交叉验证与长系列检验，模型在已知水位计算流量具备良好稳健性，将复杂的流量预报问题转化为相对成熟的关键站水位预报问题，为误差控制提供了清晰的研究框架。

从水位对流量的驱动作用来看，高水位情景下太湖—平望水位差与太浦闸流量呈强相关关系（R=0.92），与季海萍提出的平原河网区工程调度依据水位梯度动态调整的研究结论一致[54]。本研究提出的单位水位差对应的泄流能力，进一步印证了洪水演进受水力坡度主导，与徐天奕等[55]关于流域骨干工程排水能力增强，可以有效缩短高水位持续时间的结论相吻合，共同验证了以水力梯度驱动流量调控是防洪调度见效的关键机制。

从流量对水位的反馈效应来看，太浦闸泄流量的动态调整直接影响闸前壅水状态及上下游水位空间分布，进而反作用于太湖与平望水位的协同耦合关系，形成水位流量动态互馈。强降水情景下互馈关系呈现显著的区域协同调度特征与复杂响应特征：强降水导致平望、王江泾水位同步显著抬升，且王江泾水位抬升速率及峰值均高于平望，叠加下游米市渡潮位偏高的边界约束，太浦闸需临时关闸，为杭嘉湖区洪水北排提供空间，同时杭嘉湖区南排工程协同泄洪，加速王江泾水位回落至保证水位。太浦闸临时关闸期间，上游来水持续汇入而下游通道阻断，太湖水位持续上升；待区域防洪压力缓解后，太浦闸重启并加大泄流，排泄太湖滞留洪水，实现太湖水位调控。而在常水位期，太浦闸流量调控则主要用于维持河网水位稳定，此时水位流量互馈关系相对平缓，体现了多目标调度下互馈效应的情景差异性。因此，多要素驱动的动态变化会影响水位流量互馈强度与方向，区域降水的时空分布差异导致水位响应的异质性，进而影响流量对水位的反馈灵敏度；米市渡潮位顶托作为外排边界约束，会影响水位梯度对流量的驱动作用，改变水位流量互馈关系；而工程调度通过调整闸门开度，主动调控水位流量互馈过程，实现防洪、供水与生态目标的统筹协调。

3.4 模型简化与调度阈值

变量筛选表明，平望、王江泾和陈墓三站水位构建的简化模型，可以解释太浦闸流量绝大部分变异性，而加入米市渡潮位及区域降水量后模型改进有限，边际增益递减现象说明，在日尺度模拟中，近闸区水位梯度已蕴含流域降水、潮汐顶托等复杂过程的集成效应。考虑到三站水位高度协同，直接建模存在多重共线性，本研究构造太湖—平望水位差作为派生变量，既包括核心水文信息，又规避共线性问题，且符合闸孔出流水力学原理。潮位对上游流量的影响多通过水位差间接体现，与姜悦美等[56]提出的降水停止并错过天文大潮后流域骨干工程排水量明显增加的结论一致，说明出潮位顶托主要作为外排的边界约束，其影响已在水位梯度中集成，而非独立驱动因子，模型简化后保持较高精度，为面向实时调度的业务化模型提供了降维增效的可能，在稳健性与计算效率之间取得了良好平衡。

针对降水诱发平望水位显著抬升的临界条件，K-means 聚类方法提取了杭嘉湖区（28.3 mm）与阳澄淀泖区（21.7 mm）的前一日降水阈值，建议以区域平均阈值 25.0 mm 作为综合判别指标。该阈值与林荷娟等[57]提出的太浦河锑浓度异常预警指标设定为杭嘉湖区两日累计降水量达到或超过 50mm 以上，且太浦闸受强降水影响关闸时，太浦河出现锑浓度异常可能性较大的经验值基本吻合，阈值的空间差异与李伶杰[58]、何玉秀[59]指出的城镇化程度不同导致产流、汇流响应异质性的研究发现也一致。随机性校正分析进一步揭示了水位变幅的状态判别阈值：当日际水位变幅≥0.10 m 时，确定性过程占优，反之则以随机波动为主，该阈值（0.10 m）与降水阈值共同构成双阈值判别体系：当区域前一日降水量超过 25.0 mm，

且预期平望水位变幅≥0.10 m 时，系统可预警水位进入确定性抬升阶段，提示调度关注下游顶托风险，弥补了传统模型在降水水位响应与阈值效应分析的不足。

双阈值判别体系量化了降水驱动水位突变的临界条件，证实了平原河网水文系统存在稳态波动与受迫响应两种可区分的响应模式，为强降水情景下太浦闸泄流策略的动态调整、规避倒流影响工程安全提供了先导性判据，也揭示了平原感潮河网区水文系统的临界转换特征。降水作为控制变量驱动系统状态演变，水位变幅作为状态变量表征系统响应强度，水位变幅阈值与河网调蓄能力及工程调控密切相关：当水位变幅低于该阈值时，河网调蓄能力足以平抑外部扰动，系统表现为随机性主导的稳态波动；当水位变幅超过河网调蓄能力的临界点，系统进入受迫响应状态，水位变化主要受控于确定性水文过程。因此，双阈值可理解为河网调蓄容量的临界指标，超越该阈值标志着系统响应模式发生转换。

双阈值在降水驱动下存在明确的双相转换特征，即中小雨情景下，系统以常态化水位差调度为主，维持河网水位稳定；强降水情景下，系统转入风险防控主导模式，水位涨幅显著，闸前壅水与下游潮汐顶托风险同步上升，识别该模式有助于弥补传统模型预警能力不足的缺陷。在调度层面，双阈值预警体系为模式切换提供了客观定量的先兆信号，可将事后被动响应转为事前主动规避，为闸门调控赢得宝贵时间，提升太浦闸强降水情景下的自适应调度能力，为平原河网区防洪调度优化与预警机制完善提供理论支撑与实践参考。

综上，本研究提出的主成分降维、回归建模、聚类阈值识别的耦合框架，将自然水文机制与工程调度逻辑融合建模，揭示了太浦闸流量变化的多因素协同驱动机制、水位流量互馈关系；采用聚类分析识别阈值、随机性校正判别状态、机理阐释关联模式的技术路径，解决了多因素水文变量信息冗余、以及传统模型中常见的多重共线性问题，实现了自然水文机制与人为调度逻辑在统计模型中的协同表达，形成了从机制识别、变量筛选、模型构建再到阈值预警完整链条。本研究在变量筛选、模型降维简化以及阈值预警等方面的技术路径具有普适性，对平原感潮河网区同时受自然水文过程与工程调度共同调控的水利工程的精细化模拟与调度提供了可移植的范式。研究结果在多方面与已有文献相互印证，既从数据层面验证了现行调度逻辑的合理性，也通过挖掘阈值响应规律为精细化调度提供了新途径。

本研究成果已在流域实际调度中初步应用，基于 2023—2025 年连续水文资料进行的回溯验证表明，模型对太浦闸日均流量的模拟值与实测值吻合较好，尤其在太湖高水位情景下拟合精度较高。相关模型与阈值体系已集成至太湖流域预报调度一体化平台，实现了从实时模拟、风险预警、调度预演的决策闭环，有效支撑了日常会商与应急调度决策，显著提升了太浦闸在变化环境下的自适应调控能力，推动了流域调度从经验驱动向风险预判与决策支持的智能化转型，为太湖流域洪水风险管理与水资源优化配置提供了精准可靠的决策支撑，获得上级主管部门高度肯定。后续将结合更长序列的实测资料，持续开展模型泛化能力评估与参数优化，以进一步提升其在复杂水文情景下的预报稳健性与决策支持效能。面对全球气候变化与城镇化进程持续推进所引发的流域水文情势日趋复杂、调度场景多元的挑战，未来可以识别太湖水位对降水的响应阈值，与平望水位阈值共同构建上下游联动的完整预警体系，融合深度学习等人工智能方法，以增强模型对极端情景的模拟与泛化能力，将本研究成果在更广泛的工程场景中开展持续性业务化应用与动态验证，从而推动流域工程调度从经验驱动模式向数据机理协同双驱动的智能化决策转变。

4 结论

本研究针对太浦闸流量模拟中多因素驱动机制不清、模型复杂及降水水位响应阈值缺失的问题，构建了耦合主成分分析、随机校正率与 K-means 聚类的适用于平原感潮河网区调度需求的数据驱动框架，通过机制解析、变量筛选、阈值识别的流程，结合分阶段、多尺度的数据利用策略，实现了自然机制与调度逻辑的协同表达，可为类似平原感潮河网区水利工程的精细化调度与智能决策提供科学参考，主要结论如下：

1）在机制识别方面，研究明确了太浦闸流量变化主要受区域河网水位协同、降水产流效应和上下游水位拮抗三类主导过程调控，量化了平望 8:00 水位的关键作用。基于 2020—2025 年 6 年日尺度数据的

主成分分析表明，前三主成分累积贡献率达 93.47%，多因素驱动机制解析表明，平望、王江泾、陈墓三站水位是核心驱动因子，但三者之间存在强相关性（r＞0.97），直接建模存在多重共线性问题，太湖水位与下游水位通过水位梯度共同影响泄流，从多因素协同角度阐明了自然水文过程与工程调度干预在该复杂耦合系统中的作用路径，为构建具有物理可解释性的响应关系奠定了机制基础。

2）在建模方面，聚焦 2020 年太湖高水位 44d 连续过程，本研究构建了具有明确物理意义的派生变量（太湖—平望水位差）模型，揭示太浦闸流量与太湖—平望水位差之间存在显著线性关系（R=0.92），留一法验证表明该响应关系稳健且具泛化能力。在高水位情景下，太湖—平望水位差对流量的解释能力（R=0.90）显著优于太湖—王江泾（0.69）和太湖—陈墓（0.65），验证了平望作为核心水力梯度构成断面的科学合理性。采用 2020—2025 年长系列数据进行验证，揭示了高水位组水位差与太浦闸流量仍保持强线性关系（R=0.90），与 2020 年结果高度一致，证明该水力驱动关系具有良好的年际稳定性。派生变量模型既规避了三站水位间的多重共线性问题，又符合闸孔出流的水力学原理，为平原感潮河网区水闸流量响应分析提供了兼具解释力与可靠性的技术范式。

3）在阈值预警方面，基于 2023—2025 年连续 1096d 日观测数据，校正随机率与 K-means 聚类方法，建立了区域降水水位响应双阈值预警体系，以 2023—2024 年数据为训练集确定降水阈值为 25.0 mm，水位变幅阈值为 0.10 m，经 2025 年独立测试集验证，整体判别准确率超过 93.5%，可以有效辨识平望水位是否进入确定性抬升阶段，为强降水情景下太浦闸自适应调度与闸前雍水风险防控提供了定量化、先导性的决策依据，显著提升了调度决策的前瞻性与风险应对能力。

随着全球气候变化与城镇化进程持续推进，太湖流域水文情势与调度场景趋于复杂。未来研究可在以下方面深化：结合深度学习等人工智能方法，增强对复杂互馈关系与极端情景的响应规律挖掘能力；对本研究构建的数据驱动体系持续开展持续性业务化应用与动态验证，进一步提升太湖流域洪水风险协同管控与水资源优化配置的精准决策水平。

5 参考文献

[1] Wu HY, Lu ZH. Review and thinking of water management practice in Taihu Basin. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, **52**(3): 277-290. [吴浩云, 陆志华. 太湖流域治水实践回顾与思考. 水利学报, 2021, **52**(3): 277-290.]

[2] Wu HY, Liu M, Jin K *et al*. Research on multi-objective driven dispatching water level of Lake Taihu. *J Lake Sci*, 2023, **35**(3): 1009-1021. DOI: 10.18307/2023.0320. [吴浩云, 刘敏, 金科等. 多目标驱动的太湖调度水位研究. 湖泊科学,2 023, **35**(3): 1009-1021.]

[3] Li C, You LX, Lai XJ. Research and application of key technologies in construction of digital twin for Taipu Gate. *Water Resources Informatization*, 2024, (5): 45-49. DOI: 10.19364/j.1674-9405.2024.05.008. [李超, 尤林贤, 赖昕杰. 数字孪生太浦闸建设关键技术研究与应用. 水利信息化, 2024, (5): 45-49.]

[4] Wu J, Lin HJ. Flood risk forecast of Taihu Lake Basin based on coupled atmospheric-hydrological modeling system. *Yangtze River*, 2023, **54**(11): 1-7, 22. [吴娟, 林荷娟. 基于陆气耦合模型系统的太湖流域洪水风险预测. 人民长江, 2023, **54**(11): 1-7, 22.]

[5] Wu J, Qian AR, Lin HJ. Research on coping with extreme rainstorm flood and enhancing flood safety resilience—taking the Taihu basin as an example. *China Water Resources*, 2024, (8): 25-32. [吴娟, 钱傲然, 林荷娟. 应对极端暴雨洪水与提升防洪安全韧性研究——以太湖流域为例.中国水利, 2024, (8): 25-32.]

[6] Wu J, Lin HJ, Jiang GH *et al*. Risk warning system construction and application under excessive extreme flood. *Journal of Hohai University*: *Natural Sciences*, 2023, **51**(2): 164-170. [吴娟, 林荷娟, 姜桂花等. 太湖流域超标特大洪水风险预警系统建设及应用. 河海大学学报: 自然科学版, 2023, **51**(2): 164-170.]

[7] Li XT, Wang LZ, Shang SW *et al*. Research on mute feed effect of flood and waterlogging under change of working condition and dispatching of flood control project in basin, sub-basin and urban. *Journal of Hohai University*: *Natural Sciences*, 2024, **52**(2): 12-18. [李曦亭, 王磊之, 商守卫等. 流域、区域和城镇防洪工程工况与调度变化的洪涝互馈效应研究. 河海大学学报: 自然科学版, 2024, **52**(2): 12-18.]

[8] 吴娟, 薛涛, 钱傲然等. 太浦河水量水质空间分异与动态响应效应研究. 2025（第九届）中国水资源高效利用与节水技术交流会论文集. 2025: 533-540.

[9] Deng C, Sun PY, Yin X *et al*. Runoff simulation in the upper Han River Basin using physics-informed machine learning-model. *J Lake Sci*, 2025,

37(1): 279-292. DOI: 10.18307/2025.0143. [邓超, 孙培源, 尹鑫等. 基于概念性水文模型与长短时记忆模型耦合的汉江上游流域径流模拟.湖泊科学, 2025, **37**(1): 279-292.]

[10] Yang YM, Shi P, Qu SM *et al*. Application comparison of different error correction methods in flood forecasting in Qujiang River watershed. *Journal of Hohai University*: *Natural Sciences*, 2025, **53**(3): 8-14. [杨雨蒙, 石朋, 瞿思敏等. 不同误差校正方法在衢江流域洪水预报中的应用对比. 河海大学学报: 自然科学版, 2025, **53**(3): 8-14.]

[11] Yuan WL, Song HZ, Liu MQ. An early warning model for flash floods based on random rainfall patterns. *Advances in Water Science*, 2019, **30**(4): 515-527. [原文林, 宋汉振, 刘美琪. 基于随机雨型的山洪灾害预警模式. 水科学进展, 2019, **30**(4): 515-527.]

[12] Qin R, Zhang XQ. Comparison on the application performance of LSTM flood forecasting model under different input methods. *J Lake Sci*, 2025, **37**(4): 1470-1481. DOI: 10.18307/2025.0444. [覃睿, 张小琴. 不同输入设置对 LSTM 洪水预报模型应用效果的影响. 湖泊科学, 2025, **37**(4): 1470-1481.]

[13] Wang YT, Su X, Wang LZ *et al*. A refined assessment of urban flood resilience. *Advances in Water Science*, 2025, **36**(6): 933-948. [王银堂, 苏鑫, 王磊之等. 城市洪涝灾害应对韧性精细化评估. 水科学进展, 2025, **36**(6): 933-948.]

[14] Wen YH, Huo WB, Liu LQ. Application of principal component analysis based K-means clustering algorithm in real-time flood forecasting. *Journal of China Hydrology*, 2025, **45**(5): 36-43. [温娅惠, 霍文博, 刘龙庆. 基于主成分分析的 K-Means 聚类算法在实时洪水预报中的应用. 水文, 2025, **45**(5): 36-43.]

[15] Sang YF, Li XX, Xie P *et al*. Universal framework for hydrological time series probabilistic forecasting. *J Lake Sci*, 2018, **30**(3): 611-618. DOI: 10.18307/2018.0303. [桑燕芳, 李鑫鑫, 谢平等. 水文时间序列概率预报方法的通用架构. 湖泊科学, 2018, **30**(3): 611-618.]

[16] Chen YP, Han T, Qiu C *et al*. Water level forecasting method for the Yongjiang River Estuary based on harmonic analysis and VMD-LSTM hybrid model. *Journal of Hohai University*: *Natural Sciences*, 2025, **53**(2): 1-10. [陈永平, 韩韬, 邱超等. 基于调和分析及 VMD-LSTM 混合模型的甬江河口水位预报方法. 河海大学学报: 自然科学版, 2025, **53**(2): 1-10.]

[17] Ye KJ, Liang ZM, Chen HY *et al*. Research on regional long-short term memory neural network (LSTM) flood forecasting model. *J Lake Sci*, 2025, **37**(2): 651-659. DOI: 10.18307/2025.0245. [叶可佳, 梁忠民, 陈红雨等. 区域化长短期记忆神经网络(LSTM)洪水预报模型研究. 湖泊科学, 2025, **37**(2): 651-659.]

[18] Zeng XM, Fan H, Zhang FF *et al*. Integrated flood control and drainage model for the Chuhe River Basin. *Journal of Hohai University*: *Natural Sciences*, 2025, **53**(4): 28-37, 88. [曾贤敏, 范辉, 张非凡等. 滁河流域防洪排涝一体化模型.河海大学学报: 自然科学版, 2025, **53**(4): 28-37, 88.]

[19] Ma Q, Wang Y, Wei L *et al*. A modelling-based assessment approach of basin flood spatiotemporal characteristics. *Advances in Water Science*, 2024, **35**(5): 726-737. [马强, 王莹, 魏琳等. 基于分布式模型的流域洪水时空特征分析方法. 水科学进展, 2024, **35**(5): 726-737.]

[20] Zhang PP, Wu YF, Pang SJ *et al*. CODCr degradation coefficient of urban river recharged with reclaimed water and its impacting factors. *J Lake Sci*, 2019, **31**(1): 99-112. DOI: 10.18307/2019.0110. [张培培, 吴艺帆, 庞树江等. 再生水补给河流北运河 CODCr 降解系数变化及影响因素. 湖泊科学, 2019, **31**(1): 99-112.]

[21] Liu S, Yang Y, Wang YC. Mapping supply and demand differentiation of hydrological regulation service based on matrix analysis: A case study of Jiaxing City, Zhejiang Province. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(4): 1189-1202. DOI: 10.5846/stxb201807251586. [刘颂, 杨莹, 王云才. 基于矩阵分析的水文调节服务供需关系时空分异研究——以嘉兴市为例. 生态学报, 2019, **39**(4): 1189-1202.]

[22] Dai JJ, Chen H, Peng YM *et al*. Impacts of water quantity and quality joint operation for Taipu sluice on water quality in Jinze reservoir. *Hydro-Science and Engineering*, 2017, (4): 20-27. [戴晶晶, 陈红, 彭焱梅等. 太浦闸水量水质联合调度对金泽水库水质影响. 水利水运工程学报, 2017, (4): 20-27.]

[23] Mo ZJ, Lou S, Liu SG *et al*. Spatiotemporal evolution and return period analysis of compound floods along the Huangpu River under typhoon influence. *Advances in Water Science*, 2025, **36**(5): 832-845. [莫振杰, 娄厦, 刘曙光等. 台风影响下黄浦江复合洪水的时空演变与重现期分析. 水科学进展, 2025, **36**(5): 832-845.]

[24] Wang J, Wei H, Zeng XM *et al*. Simulation and analysis of regulation capacity of plain tidal river networks at Jiabao north area in Shanghai. *Water Resources and Power*, 2026, **44**(3): 36-40. [王杰, 韦浩, 曾贤敏等. 上海市嘉宝北片平原感潮河网调蓄能力模拟及分析. 水电能源科学, 2026, **44**(3): 36-40.]

[25] Kuang HF, Hu CH, Wu GL *et al*. Combination of PCA and PMF to apportion the sources of heavy metals in surface sediments from Lake Poyang during the wet season. *J Lake Sci*, 2020, **32**(4): 964-976. DOI: 10.18307/2020.0406. [匡荟芬, 胡春华, 吴根林等. 结合主成分分析法(PCA)和正

定矩阵因子分解法(PMF)的鄱阳湖丰水期表层沉积物重金属源解析. 湖泊科学, 2020, **32**(4): 964-976.]

[26] Zhang J, Li Z. Analysis of water quality evolution and the influence of hydrological elements at the outlet section of Nansi Lake. *Journal of Gansu Sciences*, 2025, **37**(5): 65-72. [张健, 李振. 南四湖出口断面水质演变与水文要素影响分析. 甘肃科学学报, 2025, **37**(5): 65-72.]

[27] Chu KJ, Yang X, Liu L *et al*. Assessment framework of river connectivity using KPCA method in the watershed of Yangtze River Delta. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2025, **34**(8): 1708-1720. DOI: 10.11870/cjlyzyyhj202508006. [褚克坚, 杨煊, 刘朗等. 基于核主成分分析的长三角地区河网水系连通性评价模型研究.长江流域资源与环境, 2025, **34**(8): 1708-1720.]

[28] Li B, Tian FQ, Li YK *et al*. Development of a spatiotemporal deep-learning-based hydrological model. *Advances in Water Science*, 2022, **33**(6): 904-913. [李步, 田富强, 李钰坤等. 融合气象要素时空特征的深度学习水文模型. 水科学进展, 2022, **33**(6): 904-913.]

[29] Li LL, Zhang R, Miao FH *et al*. The evolution characteristics and influencing factors of water quality in Lake Baiyangdian during 1992-2023. *J Lake Sci*, 2025, **37**(6): 1996-2008. DOI: 10.18307/2025.0621. [李琳琳, 张瑞, 苗飞虎等. 1992—2023 年白洋淀水质变化特征及影响因素分析. 湖泊科学, 2025, **37**(6): 1996-2008.]

[30] Xue WF, Chu YQ, Liu Q *et al*. Groundwater quality assessment in Dalian based on principal component analysis and fuzzy comprehensive evaluation. *Journal of Liaoning University*: *Natural Science Edition*, 2020, **47**(3): 218-226. [薛伟锋, 褚莹倩, 刘强等. 主成分分析和模糊综合评价法在大连市地下水水质评价中的应用研究. 辽宁大学学报: 自然科学版, 2020, **47**(3): 218-226.]

[31] Nuerhasimu M, Gao L, Sun L *et al*. Experimental research of rock burst tendency prediction based on principal component analysis. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2025, **56**(S2): 230-238. [努尔哈斯木·穆哈买提汗, 高磊, 孙丽等. 基于主成分分析的岩爆倾向性预测试验研究. 水利水电技术（中英文）, 2025, **56**(S2): 230-238.]

[32] Fu BR, Su J, Wu D *et al*. Evaluation of temporal and spatial differences of water environment in Liaohe Basin. *Water Resources Protection*, 2011, **27**(6): 5-8. [付保荣, 苏杰, 吴丹等. 辽河流域水环境时空差异性评价.水资源保护, 2011, **27**(6): 5-8.]

[33] Deng C, Chen CY, Yin X *et al*. Catchment runoff simulation by coupling data assimilation and machine learning methods. *Advances in Water Science*, 2023, **34**(6): 839-849. [邓超, 陈春宇, 尹鑫等. 融合数据同化与机器学习的流域径流模拟方法. 水科学进展, 2023, **34**(6): 839-849.]

[34] Huang WL, Xia SX, Yu XB. Importance of sub-lakes in Lake Poyang for wintering geese: An assessment and conservation gap analysis. *J Lake Sci*, 2026, **38**(1): 277-295. DOI: 10.18307/2026.0135. [黄薇霖,夏少霞,于秀波.鄱阳湖碟形湖对越冬雁类的重要性评估与保护空缺识别.湖泊科学,2026,**38**(1):277-295.]

[35] Hotelling H. Analysis of a complex of statistical variables into principal components. *Journal of Educational Psychology*, 1933, **24**(6): 417-441. DOI: 10.1037/h0071325.

[36] Ouyang CY, Qin Y, Liu Z *et al*. Prediction of CO_2, CH_4 diffusion fluxes at the water-air interface and analysis on its influencing factors using machine learning algorithms in the Three Gorges Reservoir. *J Lake Sci*, 2023, **35**(2): 449-459. [欧阳常悦, 秦宇, 刘臻等. 基于机器学习的水-气界面 CO_2、CH_4 扩散通量预测及影响因素分析——以三峡水库为例. 湖泊科学, 2023, **35**(2): 449-459.]

[37] Mo LQ, Yang Y, Tai YP *et al*. Recovery and environmental driving mechanisms of attached algae communities during the near-natural restoration of urban rivers. *J Lake Sci*, 2025, **37**(6): 1926-1937. DOI: 10.18307/2025.0614. [莫露清, 杨扬, 邰义萍等. 城市河流近自然修复过程中附着藻类群落恢复与环境驱动机制.湖泊科学, 2025, **37**(6): 1926-1937.]

[38] Zeng FL, You BY, Dai QY *et al*. Hydrological seasonality-driven transitions in phytoplankton community assembly mechanisms in a cascade river. *Journal of Hydroecology*,2026. DOI.:10.15928/j.1674-3075.202511010001. [曾福连, 尤炳源, 代其雨等. 水文季节驱动下梯级河流浮游植物群落构建机制的转换. 水生态学杂志,2026.]

[39] Ning DL, Deng Y, Tiedje JM *et al*. A general framework for quantitatively assessing ecological stochasticity. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, **116**(34): 16892-16898. DOI: 10.1073/pnas.1904623116.

[40] Ding W, Zhao MC, Wang QN *et al*. Research on dynamic identification of flood types based on clustering and decision trees. *Water Resources Protection* 2026，42(4)：139-149 [丁伟, 赵美晨, 王浅宁等. 基于聚类及决策树的洪水类型动态识别研究. 水资源保护,2026，42(4)：139-149]

[41] Xing ZX, Hou QY, Wang YN *et al*. Health assessment of lakes in the Daqing region based on cluster characteristics and random forest algorithm. *Water Resources Protection,* 2026，42(4)：242-250，271. [邢贞相, 侯泉滢, 王轶男等. 基于群组特征与随机森林算法的大庆地区湖泊健康评价. 水资源保护,2026，42(4)：242-250，271.]

[42] Liang FM, Tan C, Huang FH *et al*. The impact of precipitation spatiotemporal feature extraction based on K-means clustering on hydrological model predictions. *Water Resources and Hydropower Engineering,*2026，57(1)：192-204 [梁峰铭, 谭超, 黄锋华等. 基于 K-means 聚类的降雨时空特

征提取对水文模型预测结果的影响. 水利水电技术（中英文）2026，57(1)：192-204.]

[43]马农乐, 李敏, 王元元等. 太浦闸泄洪流量变化对下游河网地区的影响分析. 浙江水利科技, 2017, **45**(3): 1-4, 16.

[44] Wu HY, Zhang HH. Practices of water diversion from the Yangtze River to the Taihu Lake for 20 years and considerations. *China Water Resources*, 2022, (14): 1-3, 6. [吴浩云, 章杭惠. 引江济太 20 年实践与启示. 中国水利, 2022, (14): 1-3,6.]

[45] Wang ZZ, Wang YT, Wu HY *et al*. Novel flood season division method based on fuzzy time series-effective cluster and its application to Taihu lake basin. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2012, **31**(5): 29-34. [王宗志, 王银堂, 吴浩云等. 基于模糊时序有效聚类的太湖流域汛期分期研究. 水力发电学报, 2012, **31**(5): 29-34.]

[46] Zhong HY, Chen QY. Application of stage discharge prediction model based on multi marginal conditions in flood control and water resources dispatching. *Jiangsu Water Resources*, 2025, (3): 7-11. [钟惠钰, 陈荣尧. 基于多边际条件下的水位流量预测模型在防洪和水资源调配中的应用. 江苏水利, 2025, (3):7-11.]

[47] Luo Y, Dong ZC, Guan XK *et al*. Flood risk analysis in the Taihu Basin during flood periods based on *Copula* function. *J Lake Sci*, 2020, **32**(1): 223-235. [罗赟, 董增川, 管西柯等. 基于 *Copula* 函数的太湖流域汛期洪涝灾害危险性分析.湖泊科学, 2020, **32**(1): 223-235.]

[48] Wu HY, Gan YY, Jin K. A retrospect on the water diversion project from Yangtze River to Lake Taihu during 2002-2021: Practices, achievements and future challenges. *J Lake Sci*, 2022, **34**(5): 1393-1412. DOI: 10.18307/2022.0500. [吴浩云, 甘月云, 金科. "引江济太"20 年: 工程实践、成效和未来挑战. 湖泊科学, 2022, **34**(5): 1393-1412.]

[49] Song C, Wang Q, Xu YP *et al*. Variation characteristics of joint frequency for compound extreme hydrological events under the background of urbanization in the Taihu Basin. *J Lake Sci*, 2025, **37**(6): 2212-2223. DOI: 10.18307/2025.0641. [宋琛, 王强, 许有鹏等. 城镇化背景下太湖平原地区水文极端事件的联合频率变化特征. 湖泊科学, 2025, **37**(6): 2212-2223.]

[50] Yu ZH, Liu PF, He YX *et al*. Temporal and spatial variation of rainfall characteristics under high urbanization in the Lake Taihu Plain. *J Lake Sci*, 2022, **34**(6): 2134-2143. DOI: 10.18307/2022.0625. [于志慧, 刘鹏飞, 何玉秀等. 太湖平原高度城镇化下降雨特征时空变化研究. 湖泊科学, 2022, **34**(6): 2134-2143.]

[51] Jiang FQ, Zhu YQ, Dong JX *et al*. Response of extreme precipitation to urbanization in Taihu Basin considering regional heterogeneity. *J Lake Sci*, 2025, **37**(2): 627-639. DOI: 10.18307/2025.0243. [蒋飞卿, 朱易青, 董家贤等. 考虑区域异质性的太湖流域极端降雨对城镇化的响应规律. 湖泊科学, 2025, **37**(2): 627-639.]

[52] Wu J, Liang P, Lin HJ *et al*. Meiyu determination and causes of typical abnormal Meiyu years in Taihu Basin. *J Lake Sci*, 2021, **33**(1): 255-265. DOI: 10.18307/2021.0118. [吴娟, 梁萍, 林荷娟等. 太湖流域梅雨的划分及其典型年异常成因分析. 湖泊科学, 2021, **33**(1): 255-265.]

[53] Wei YY, Li YP, Weng SL *et al*. Impact of urbanization on stream structure and connectivity of plain river network in the Taihu Basin. *J Lake Sci*, 2020, **32**(2): 553-563. DOI: 10.18307/2020.0223. [魏鋆鋆, 李一平, 翁晟琳等. 太湖流域城市化对平原河网水系结构与连通性影响. 湖泊科学, 2020, **32**(2): 553-563.]

[54] Ji HP, Wu HY, Wu J. Variation of inflow and outflow of Lake Taihu in 1986-2017. *J Lake Sci*, 2019, **31**(6): 1525-1533. DOI: 10.18307/2019.0612. [季海萍,吴浩云,吴娟.1986—2017 年太湖出、入湖水量变化分析. 湖泊科学, 2019, **31**(6): 1525-1533.]

[55] Xu TY. Influence of spatio-temporal distribution of design storm on Lake Taihu flood level. *J Lake Sci*, 2022, **34**(4): 1308-1318. DOI: 10.18307/2022.0422. [徐天奕. 太湖流域设计暴雨时空分布对太湖洪水位影响分析. 湖泊科学, 2022, **34**(4): 1308-1318.]

[56] Jiang YM, Gan YY, Guo CY *et al*. Characteristic analysis on rainstorm and flood process during typical typhoons with heavy wind, strong storm, high tide and serious flood colliding in the Taihu Basin. *J Lake Sci*, 2026, **38**(1): 317-327. DOI: 10.18307/2026.0142. [姜悦美, 甘月云, 郭晨宇等. 太湖流域强风、暴雨、高潮、洪水“四碰头”典型台风暴雨洪水过程特性分析. 湖泊科学, 2026, **38**(1): 317-327.]

[57] Lin HJ, Gan YY, Liu M. Analysis on early-warning indexes for antimony concentration anomaly in taipu river. *Journal of China Hydrology*, 2021, **41**(1): 95-101. [林荷娟, 甘月云, 刘敏. 太浦河锑浓度异常预警指标研究. 水文, 2021, **41**(1): 95-101.]

[58] Li LJ, Hu QF, Wang YT *et al*. Spatiotemporal pattern of water yield changes over the Taihu Basin during the rapid urbanization process. *J Lake Sci*, 2019, **31**(5): 1289-1298. DOI: 10.18307/2019.0519. [李伶杰, 胡庆芳, 王银堂等. 快速城镇化进程中太湖流域产水量变化的时空分布特征.湖泊科学, 2019, **31**(5): 1289-1298.]

[59] He YX, Xu YP, Li ZY *et al*. The impacts and its contribution rate of urbanization on extreme precipitation, 1976–2015: A case study in the Lake Taihu Plain region. *J Lake Sci*, 2022, **34**(1): 262-271. [何玉秀, 许有鹏,李子贻,王强等. 城镇化对极端降水的影响及其贡献率研究——以太湖平原地区为例. 湖泊科学, 2022, **34**(1): 262-271.]